



A Mathematical Model of Bioterrorism: A Case Study of Typhoid Fever

Hojjatollah Ebadi Zadeh

Assistant Professor, Department of Mathematics, Faculty of Basic Sciences, Imam Ali University, Tehran, Iran

Email: ebadizadeh.h@gmail.com

Rasoul Hatamian

Faculty Member, Department of Basic Sciences, Faculty of Mathematical Sciences, Payame Noor University, Mashhad, Iran

Email: hatamianr@pnu.ac.ir

Azam Karandish

PhD Student, Department of Statistics, Faculty of Basic Sciences, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran (Corresponding Author)

Email: karandish_azam@yahoo.com

Abstract

One of the primary indicators of water contamination, including groundwater, is pollution by nitrates, radioactive substances, industrial chemicals, or through terrorist acts aimed at destroying water resources and harming public health. Currently, there is no practical technology to detect the exact time and location of a bioterrorist attack on water resources. However, rapid detection of security disruptions in water networks is vital for strategic foresight in water security, enabling faster control and preventing the spread of contamination. Mathematical modeling of groundwater flow, due to its ability to estimate hydraulic and hydrological parameters, serves as a crucial tool for managing groundwater resources. In this study, a mathematical model is proposed to identify the source of groundwater contamination and trace its time and location of release. This model can function as a software tool in formulating strategies for biological passive defense against potential future military-security threats, while preserving and enhancing the health and safety of water resources. Typhoid fever, one of the most common diseases resulting from contaminated food and water resources, represents a significant environmental concern in today's industrialized world. This disease may spread in military camps due to incomplete adherence to hygiene protocols. Similar to other diseases such as AIDS and hepatitis, typhoid fever is modeled within a framework of nonlinear differential equations.

Keywords: Groundwater Contamination, Inverse Problems, Typhoid Fever, Mathematical Modeling, Passive Defense





سال هشتم، شماره سوم (پیاپی ۲۷)، پاییز ۱۴۰۴، صص. ۱۰۷-۱۳۶
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

مقاله پژوهشی

بررسی مدلی ریاضی از بیوترورسیم: مطالعه موردی بیماری تب تیفوئید

حجت‌الله عبادی زاده

استادیار گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران

Email: ebadizadeh.h@gmail.com

رسول حاتمیان

عضو هیئت علمی گروه علوم پایه، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه پیام نور مشهد، مشهد، ایران

Email: hatamianr@pnu.ac.ir

اعظم کاراندیش

دانشجوی دکتری، گروه آمار، دانشکده علوم پایه، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران (نویسنده مسئول)

Email: karandish_azam@yahoo.com

چکیده

یکی از شاخص‌های اصلی آلوده بودن منابع آبی از جمله آب‌های زیرزمینی، آلودگی آن‌ها به نیترات و مواد رادیواکتیو و مواد صنعتی و یا از طریق اقدامات تروریستی به منظور انهدام منابع آبی و صدمه به سلامت جسمی مردم است. هیچ فناوری عملی در جهت شناسایی زمان و مکان واقعی حمله بیوتروریستی به منابع آب وجود ندارد، درحالی‌که کشف سریع اختلال امنیتی در شبکه منابع آب، اقدام حیاتی در آینده پژوهی امنیتی منابع آب برای کنترل سریع‌تر و جلوگیری از گسترش آلودگی است. مدل ریاضی جریان آب‌های زیرزمینی به دلیل تخمین پارامترهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی ابزاری مهم برای مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی است. در این مقاله، برای شناسایی منشأ آلودگی در آب‌های زیرزمینی و ردیابی زمان و مکان انتشار آن یک مدل ریاضی ارائه می‌شود که می‌تواند به عنوان ابزار نرم‌افزاری در تدوین راهبرد پدافند غیرعامل زیستی برای مقابله با تهدیدات نظامی-امنیتی آتی کشور همچنین حفظ و ارتقای سلامت و امنیت منابع آبی باشد. بیماری تب تیفوئید یکی از شایع‌ترین بیماری‌های ناشی از آلودگی مواد غذایی و منابع آب و یکی از مشکلات زیست‌محیطی در حال حاضر جهان صنعتی است. این بیماری ممکن است در اردوگاه‌های نظامی به دلیل عدم رعایت کامل مفاد بهداشتی شیوع پیدا کند. بیماری یادشده مانند سایر بیماری‌ها از جمله ایدز، هپاتیت و ... در قالب یک دستگاه معادلات دیفرانسیل غیرخطی مدل‌بندی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آلودگی آب‌های زیرزمینی، مسائل معکوس، تب تیفوئید، مدل‌سازی ریاضی، پدافند غیرعامل

دانشگاه عالی دفاع ملی ♦ پژوهشکده آماد، فناوری دفاعی و عرصه‌های نوپدید / فصلنامه آماد و فناوری دفاعی



20.1001.1.28212606.1404.8.3.4.3

<https://amfad.sndu.ac.ir/> E-ISSN: 2980-8073



صحت مطالب بر عهده نویسنده مقاله است و بیانگر دیدگاه دانشگاه عالی دفاع ملی نیست.



مقدمه

آینده‌پژوهی، تلاشی نظام‌مند برای نگاه به آینده بلندمدت در حوزه‌های دانش، اقتصاد، فرهنگ و هنر، محیط زیست و جامعه است و به لحاظ مفهومی و نظری قابلیت زیادی برای شناخت، تحلیل و ارائه طرح‌های مداخله در روندهای آینده در امور گوناگون از جمله محیط زیست دارد (کرمی، ۱۳۹۶؛ جلالی فراهانی، ۱۳۹۱). پژوهش و مطالعه در حوزه منابع آبی و حفظ و ارتقای امنیت آن بر ادامه حیات با رویکردی آینده‌نگرانه به منظور افزایش و ایجاد آمادگی برای مواجهه با شرایط تهدیداتی از جمله حملات بیوتروریسم در آینده و نیز تدوین سیاست‌های اجرایی مناسب، یکی از مهم‌ترین موضوع‌های علمی-پژوهشی کشور محسوب می‌شود (زندحسامی، ۱۳۹۶). آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین منبع تأمین آب شیرین و زیرساخت‌های کلیدی هر کشوری است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک بخش وسیعی از گستره کشورمان را در برمی‌گیرند. دسترسی به آب آشامیدنی سالم، یکی از نیازهای حیاتی جوامع است در مقابل حملات تروریستی آسیب‌پذیر است؛ از همین رو حفظ و نگهداری آن‌ها از طریق اعمال مدیریت صحیح بر بهره‌برداری از این منابع ضروری است. گاهی در عملیات خرابکاری، دشمن اگر از طریق حملات فیزیکی قادر به آسیب رساندن نباشد، ممکن است با عملیات تخریبی یا آلوده‌سازی، هر بخش از تأسیسات آبی را، مورد حمله قرار دهد که جبران خسارات وارده یا جایگزین کردن آن‌ها بسیار سخت و زمان‌بر خواهد بود و علاوه بر آن حوادث ثانویه‌ای را ایجاد خواهد نمود. یک حمله تروریستی یا بیوتروریستی روی تأسیسات آب‌رسانی که منجر به آلودگی منابع آبی می‌شود، ممکن است صدها نفر را کشته و صدها نفر دیگر را به همان روش تحت تأثیر قرار داده و بیمار کند و منجر به بروز شرایط بحرانی در جامعه شود. در تعریف دیگر، آلودگی آب عبارت است از هرگونه تغییر فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در محیط آب به گونه‌ای زیان‌بار که بر سلامت، بقا و فعالیت‌های انسان، حیوان، گیاهان و سایر موجودات زنده تأثیر گذارد. اگر یک تلفات انسانی در یک حادثه تروریستی مرتبط با آب، در هرکجا اتفاق بیفتد، اثرات روانی ملی آن ویرانگر خواهد بود. تعداد کمی از مردم خواهند توانست بعد از چنین حادثه‌ای عاقلانه و به



دور از احساس و توجه به خطر، فکر کرده و عمل کنند. اثرات روانی این حادثه می‌تواند بیشتر منتشر شود و در مدت طولانی‌تری باقی بماند. در چنین حملاتی، امنیت جامعه خدشه‌دار می‌شود و اعتماد مردم نسبت به مسئولین صنعت آب ضعیف می‌شود به نحوی که جبران آن ممکن است ماه‌ها زمان بخواهد. به عنوان نمونه می‌توان به اثرات تذکر وزیر محترم بهداشت در سال ۱۳۸۸ در خصوص بالاتر بودن غلظت نیترات آب آشامیدنی از حد استاندارد در بعضی مناطق تهران و افزایش خطر مصرف آن توسط شیرخواران اشاره نمود. این مطلب بشدت مورد سوءاستفاده شرکت‌های فروشنده آب‌های بطری شده قرار گرفت و جمعیت ده میلیونی تهران اقدام به خرید این آب‌ها برای مصارف شرب خود نمودند. خارج از این بحث که کیفیت این آب‌ها چقدر استاندارد و مورد اعتماد و قابل تایید است، شوک وارد شده علی‌رغم تکذیب سازمان آب منطقه‌ای تهران، اثر منفی خود را گذاشت و ماه‌ها بسیاری از مردم آب شرب خود را به صورت بطری خریدند. در آن شرایط حتی بعضی رسانه‌های داخلی با ایجاد جو ناامنی و ایجاد نگرانی و تشویش اذهان مردم، نقش ایفا نمودند و اعلام کردند در کنار آلودگی هوای تهران، آلودگی آب به نیترات، بر نگرانی‌های مردم تهران افزود. این گونه اثرات روانی غیرقابل کنترل حاصل اعلام یک مطلب اشتباه توسط مسئولین است و اگر حادثه‌ای تروریستی در خصوص آلودگی آب مصرفی کلان‌شهری مثل تهران اتفاق بیفتد، آثار و عوارض آن به سادگی قابل کنترل نخواهد بود و مطمئناً به یک بحران امنیتی اجتماعی تبدیل خواهد شد و دشمن با حربه تبلیغات مسموم خود اثرات روحی و روانی این حمله تروریستی را تشدید و دامن خواهد زد و کنترل آن را برای مسئولین هزینه‌بر و گران و مشکل خواهد نمود. لذا، در یک شرایط استراتژیک، تصرف و اشغال و آلوده نمودن آن‌ها نقش مؤثری در فعالیت و حفظ سلامت و روحیه مردم دارد. در نتیجه همیشه آب هدف ایدئالی برای یک حمله تروریستی است و به کارگیری بالاترین سطح حفاظتی برای سیستم‌های تأمین آب ضروری است، چون در حقیقت حملات عمدی روی سیستم‌های تأمین آب یک کار ساده و حدسی و اتفاقی نیست. در گذشته اتفاق افتاده و هنوز هم ادامه دارد و لازم است با ارائه راهکارهای امنیتی-دفاعی هرگونه تهدید مرتبط با سیستم‌های آب‌رسانی به موقع شناسایی،

کشف و گزارش شود (رضایان، ۱۳۹۵). از جمله فعالیت‌های تهدیدآمیز بیوتوروریستی علیه سیستم‌های آبرسانی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (توکلی ۱۳۹۶)

❖ تخریب فیزیکی سیستم‌ها: این اقدام منجر به قطع آبرسانی به علت خرابی تأسیسات و تجهیزاتی مثل پمپ‌ها، کلریناتورها، رایانه‌ها و ساختمان‌ها می‌شود. در صورت انتشار گاز کلر، سلامتی کارکنان و ساکنین مجاور تصفیه‌خانه تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛

❖ آلودگی عمدی شیمیایی که می‌تواند کیفیت آب را در مخازن و شبکه توزیع تحت تأثیر قرار دهد؛

❖ حملات سایبری که بهره‌برداری از تصفیه‌خانه آب و تأسیسات مربوطه را مختل می‌نماید؛

❖ حملات بیوتوروریستی: تصفیه‌خانه‌های آب و شبکه توزیع به‌عنوان اهداف بیوتوروریستی شناخته شده‌اند.

ویروس، عامل عفونی کوچکی است که فقط قادر است درون سلول‌های زنده یک جاندار تکثیر شود. ویروس‌ها تقریباً در تمامی اکوسیستم‌های کره زمین یافت می‌شوند و به‌عنوان عامل انتقال آلودگی به بسیاری از انواع جانداران، شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، گیاهان، حشرات، مهره‌داران و ... شناخته شده‌اند. تعداد وسیعی از ویروس‌ها عامل ایجاد بیماری در انسان‌ها، حیوانات اهلی یا گیاهان زراعی هستند.

مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای ابزارهای آزمایشگاهی مفیدی برای تست کردن تئوری‌های گذشته، ساختن تئوری‌های جدید، تخمین کمی حدسیات و یافتن پاسخ مناسب برای سؤالات پیچیده هستند. با این مدل‌ها به دست آمده می‌توان پارامترهای مشخص را جایگزین پارامترهای قبلی کرده و نتایج به دست آمده را با مدل‌های پیشین مقایسه کرد.

توجه به راه‌های انتقال بیماری‌های مسری در اجتماعات، نواحی و کشورهای مختلف به دانشمندان کمک شایانی نمود تا روش‌هایی مناسب برای جلوگیری از انتقال بیماری و یا کاهش دادن میزان انتقال پیدا کنند. موارد استفاده از این مدل‌ها بسیار است. این مدل‌ها در



برنامه‌های مقایسه‌ای، طراحی، اجرا و ارزشیابی، شناسایی روش‌های بهینه‌سازی، پیدا کردن راه‌های پیشگیری، دارو درمانی و بالاخره کنترل بیماری‌ها مورد استفاده دقیق قرار می‌گیرند. تب تیفوئید یا حصبه یک بیماری عفونی است که در اثر باکتری سالمونلا تیفی ایجاد می‌شود، این بیماری واگیردار بوده و از طریق آب و غذای آلوده گسترش می‌یابد و معمولاً با تب بالا، اسهال، بی‌اشتهایی و سردرد بروز می‌کند.

باکتری تیفوئید در آب‌های گل‌آلود تا یک ماه و در یخ تا سه ماه زنده می‌ماند، در اثر گرمای ۶۰ تا ۱۰۰ درجه از میان می‌رود و به‌خصوص نور آفتاب به‌سرعت سبب انهدام باکتری می‌شود؛ همچنین در برابر خشکی هم تا دو ماه مقاومت دارد.

این بیماری عفونی ممکن است به شکل تک‌گیر یا همه‌گیر درآید. در فصل پاییز و تابستان بیشتر به‌صورت همه‌گیر درمی‌آید، این همه‌گیری به‌خصوص در اجتماعات مانند سربازخانه‌ها و مدارس دیده می‌شود.

این بیماری در ایران در تمام فصول فراوان است ولی در تابستان و پاییز بیشتر است. در زمان جنگ که تمام این شرایط موجود است شیوع این بیماری چشمگیر است.



۱. بیماری تب تیفوئید(حصبه)

۱-۱. راه‌های سرایت بیماری

سرایت مستقیم: پرستاران و مراقبان بیماران از راه دست‌های خود آلوده می‌گردند.

سرایت غیرمستقیم: آب بهترین منبع آلودگی را تشکیل می‌دهد و این مطلب در آلودگی‌های لوله‌های آب یک محله یا یک قنات و آلوده کردن تعداد زیادی از افراد با ثبات می‌رسد، گذشته از آب، مواد غذایی، شیر و سبزیجات و نرم‌تنان دریایی (صدف‌ها، میگوها و ...) نیز ممکن است توسط آب آلوده گردند؛ آلودگی شیر، پنیر تازه توسط آب آلوده یا دست‌های آلوده دیده شده است؛ سبزیجاتی را که با کود انسانی می‌کارند احتمال آلودگی آن زیاد است؛ مگس هم عامل مهمی در پخش بیماری است.

۱-۲. نشانه‌های ابتلا

تب مختصر، خستگی، سرگیجه، کوفتگی، اختلال خواب، تلخی دهان، یبوست، سردرد شدید، درد پیشانی، درد کمر و گردن و بی‌حالی عارض می‌شود، شکم نفخ پیدا کرده و کمی دردناک می‌شود مخصوصاً در پهلوی راست و پایین شکم درد محسوس است. گاهی خون‌دماغ وجود دارد. بسیاری از بیماران در چند روز اول بیماری سرفه کرده و نشانه‌های یک برونشیت حاد را دارند.

۱-۳. عوارض حصبه

بسیار متعدد است؛ خون‌ریزی روده، سوراخ شدن روده‌ها، ورم آپاندیس، ورم کیسه صفرا، یرقان، ورم غده بناگوشی و عوارض دیگری از قبیل نارسایی قلبی، عارضه استخوانی، تنفسی، ادراری، پوستی، ورم بیضه، منتزیت، آماس کلیه‌ها (پیلونفریت) و تورم مفصلی ملاحظه می‌شود.

۱-۴. راه‌های جلوگیری و درمان

تشخیص این بیماری معمولاً از طریق آزمایش ویدال انجام می‌گیرد. درمان تب تیفوئید پس از کنترل عوارض بیماری و پایدار شدن علائم حیاتی با استفاده از آنتی‌بیوتیک (قبلاً کلرامفنیکل و امروزه فلوروکینولون یا سفتریاکسون) صورت می‌گیرد. عدم آشامیدن آب‌های ناسالم در



مناطق که بیماری در آن شایع است یکی دیگر از راه‌های پیشگیری است. واکسن تب تیفوئید نیز در جلوگیری از ابتلا به آن مفید است. رژیم غذایی و الکترولیت: باید به بیماران مقادیر کافی مایع رسانده شود و برای این منظور تشویق بیماران به نوشیدن مایعات زیاد لازم است. توجه به تعادل آب و الکترولیت هنوز مهم‌ترین و فوری‌ترین اقدام است. درمان با آنتی‌بیوتیک‌ها با توصیه پزشک که معمولاً کینولون‌ها یا سفالوسپورین‌ها هستند.

۲. بیماری‌های ناشی از ویروس

بیماری‌های رایج در انسان از قبیل سرماخوردگی، آنفلوانزا، آبله‌مرغان و تاول‌های تب‌خالی در اثر ویروس‌ها هستند. در حال حاضر ۲۱ خانواده از ویروس‌ها شناخته شده‌اند که عامل ایجاد بیماری در انسان هستند. شکل (۱)، بیماری‌های مهمی را که در اثر ویروس‌های مختلف در انسان‌ها ایجاد می‌گردند، نشان می‌دهد. برخی از این بیماری‌ها، از قبیل سندرم نقص ایمنی اکتسابی (ایدز)^۱، هپاتیت، «هرپس سیمپلکس»^۲، سرخک، آنفلوانزای مرغی، سارس و ... بسیار مسری هستند؛ همچنین ویروس‌ها جزء مهمی از عوامل انتقال بیماری هستند. مرگ‌ومیر در اثر بیماری‌های عفونی در سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۷ در نمودار (۱)، نشان داده شده است. در حدود ۳/۵ و ۴/۴ میلیون مرگ در اثر بیماری‌های حاد تنفسی به‌ترتیب در ۱۹۹۸ و ۲۰۰۷ رخ داد که بسیاری از آن‌ها ناشی از ویروس‌ها بودند. ایدز در ۱۹۹۸ و ۲۰۰۷ به‌ترتیب ۲/۳ و ۱ میلیون نفر را در سراسر دنیا کشته است و سرخک هنوز یک کشنده مهم در کشورهای درحال توسعه است. برخی از ویروس‌ها از قبیل HIV، آنفلوانزا، «بیماری‌های ناشی از حشرات»^۳، تب زرد و «دنگ»^۴ بسیار همه‌گیر هستند. مطابق گزارش سازمان بهداشت جهانی در مورد وضعیت و روند جهانی HIV / ایدز، تقریباً ۷۰ میلیون نفر با ویروس آلوده شده‌اند و در حدود ۳۵ میلیون نفر در اثر ایدز از زمانی که فراگیر شدن آن شروع شده است جان خود را از دست داده‌اند. هرچند که بار فراگیر بودن بیماری به میزان قابل توجهی در میان

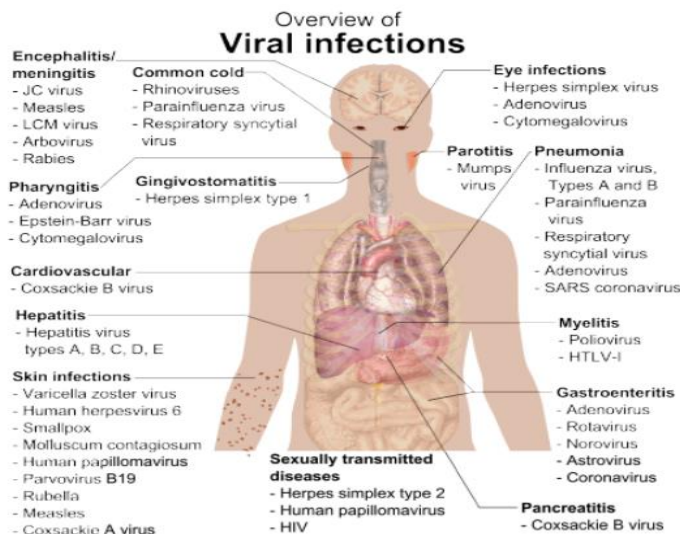
1. Acquired immune deficiency syndrome (AIDS)

2. Herpes Simplex

3. Insect-Borne Diseases

4. Dengue

کشورها و مناطق متفاوت است؛ اما این بیماری همه گیر همچنان ادامه دارد و در پایان سال ۲۰۱۱، تخمین زده شد که ۳۴ میلیون نفر (۳۵/۹-۳۱/۴ میلیون) و ۰/۸ درصد از بزرگسالان بین ۴۹-۱۵ سال در سراسر جهان با HIV زندگی می کردند.



شکل ۱: بررسی اجمالی انواع مهم عفونت ویروسی و مهم ترین گونه های مربوط به آن

بسیاری از ویروس های خطرناک به گونه ای مؤثر توسط واکسیناسیون کنترل شده اند. واکسن های مفیدی برای ویروس های ایجادکننده بیماری ها، مانند آبله مرغان، سرخک، سرخچه، صرع، «واریسلا زوستر»^۱، هپاتیت A و B وجود دارد. انتشار برخی از این بیماری ها مثل سرخک به طور چشمگیری در برخی از کشورهای توسعه یافته توسط کاربرد واکسن ها کاهش یافته است. هرچند که این بیماری ها هنوز در بسیاری از کشورهای در حال توسعه منجر به بیماری زایی می گردند. علاوه بر این، برای بسیاری از ویروس های عامل بیماری های مهم، مانند هپاتیت C، هپاتیت D و HIV هنوز واکسنی وجود ندارد.

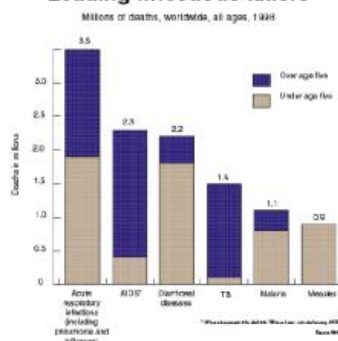
ویروس ها مکانیسم های مختلفی برای بیماری زایی در یک جاندار دارند که به میزان زیادی وابسته به نوع ویروس است. ویروس ها معمولاً به میزبان از طریق «تحلیل سلول»^۲، تولید مواد

1. Varicella-Zoster
2. Cell lysis

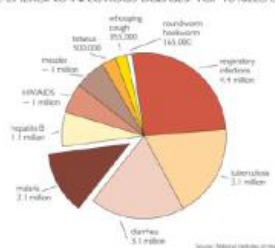


سمی و تغییر شکل سلول آسیب وارد می‌سازند. هنگامی که یک ویروس به سلول وارد می‌شود و چرخه تکثیر طبیعی خود را کامل می‌کند، سلول میزبان به دلیل فشار فیزیکی داخلی وارد شده ناشی از تکثیر ویروس یا پاسخ دفاعی متحمل تجزیه می‌گردد. افزون بر این، در طول دوره تکثیر ویروس، بسیاری از اجزای ویروسی سمی و همچنین فرآورده‌های فرعی ناشی از ازدیاد سلولی در سلول تجمع می‌یابند. تجزیه سلول و ترکیبات سمی منجر به مرگ سلول می‌گردد. در جانداران چند سلولی، اگر تعداد کافی از سلول‌ها از دست بروند، کل سیستم جاندار از عوارض آن رنج خواهد برد. برخی از ویروس‌ها، اگر به تکثیر خود درون بدن، با وجود مکانیسم‌های دفاعی میزبان، ادامه دهند، می‌توانند منجر به ایجاد عفونت در تمام عمر و یا عفونت مزمن گردند. این رویه در ویروس‌های عامل هپاتیت B و C وجود دارد.

Leading infectious killers



GLOBAL DEATHS DUE TO EMERGING AND RE-EMERGING INFECTIOUS DISEASES TOP 10 KILLERS



نمودار ۱: عوامل کشنده عفونی در ۱۹۹۸ و ۲۰۰۷

در جهت تأمین اقدامات راهبردی امنیتی-دفاعی برای مقابله با تهدیدات آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین اهرم کنترل و نظارت در صنعت آب آشامیدنی پایش و کنترل تمام اجزای سیستم تأمین و تصفیه و توزیع آب است. لازم است آسیب‌پذیری شبکه‌ها و منابع آبی نسبت به حملات احتمالی برحسب بزرگ‌ترین ریسک امنیتی منابع آب مورد توجه قرار گیرد. ایجاد یک سیستم ایمن و مناسب جهت پیشگیری از تهدید، شناسایی به‌موقع و به تأخیر انداختن

تهدید ضروری است. باید با حفاظت از منابع آب و شبکه توزیع آب، متناسب با نوع تهدیدات موجود از آلودگی عمدی منابع و سیستم‌های تأمین آب آشامیدنی ممانعت نمود. باید برای مقابله با حوادث مختلف احتمالی در رابطه با آلودگی آب به عوامل میکروبی بیماری‌زا، سموم شیمیایی و ...، دستورالعمل‌های ویژه تنظیم و به نحو مناسب مثل تهیه پوسترهای خاص به مردم اطلاع‌رسانی گردد تا تلفات و خسارات حوادث احتمالی به حداقل لازم کاهش یابد. از بین مردم به‌ویژه کسانی که در اطراف منطقه استقرار تأسیسات آبی زندگی می‌کنند باید افراد خاصی را انتخاب نمود و با گذاشتن دوره‌های آموزشی اختصاصی آن‌ها را نسبت به حوادث احتمالی در رابطه با منابع و سیستم‌های آب‌رسانی آگاه و حساس نمود تا با دیدن هرگونه حرکت مشکوکی بلافاصله آن را به مسئولین ذی‌ربط گزارش نمایند. چون به مردمی که در اطراف و نزدیک این اماکن آبی قرار دارند، نسبت به آن‌هایی که در مناطق دوردست قرار دارند خسارات و آسیب‌های بیشتری وارد می‌شود (زندحسامی، ۱۳۹۶).

۳. راهبردهای پدافند غیرعامل با رویکرد آینده‌پژوهی در حفظ امنیت منابع آبی

جمهوری اسلامی ایران، همواره به دلیل بهره‌مندی از منابع عظیم نفت و گاز و منابع آبی و زیستی مورد تهدید مزمن و پایدار برخی کشورهای متخاصم قرار دارد. پدافند غیرعامل به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که به‌کارگیری آن‌ها مستلزم استفاده از جنگ‌افزار نبوده، اما اجرای آن‌ها موجب جلوگیری از حمله احتمالی دشمن شده یا تلفات و خسارت‌های ناشی از تهاجم دشمن را کاهش می‌دهند. طرح‌های پدافند غیرعامل باید در برگیرنده شناسایی و پیش‌بینی تهدیدات و تبیین تهدید غالب، راه‌های کاهش خطر و مقابله با تهدیدات، بررسی خسارت‌های محتمل ناشی از حملات دشمن، راه‌های کاهش و کنترل خسارت‌ها و راه‌حل‌های احیا و بازسازی آسیب‌های وارده باشند (یحیی پور، ۱۳۹۵). سند چشم‌انداز بیست‌ساله کشور، قانون برنامه چهارم توسعه، قانون بودجه سال ۱۳۸۵ و سایر قوانینی که به‌صورت مستقیم یا تلویحی به موضوع پدافند غیرعامل اشاره نموده است، یکی از حوزه‌های



مهم پدافند غیرعامل، پدافند زیستی است. پدافند زیستی، مجموعه‌ای از اقدامات از قبیل رصد و پایش، آشکارسازی، هشداردهی، تشخیص و تصمیم و عملیات، کنترل، مدیریت بحران، حفاظت و پیشگیری، امداد و نجات، درمان، بازیابی و بازتوانی منابع، محدودسازی و رفع آلودگی در برابر تهدیدات زیستی است که موجب حفاظت از سرمایه‌های ملی در برابر تهدیدات زیستی و کاهش آثار و عواقب ناشی از آن‌ها می‌گردد. در آیین‌نامه اجرایی بند ۱۱ ماده ۱۲۱ قانون برنامه چهارم و آیین‌نامه‌های اجرایی مربوط به موضوع پدافند غیرعامل که به نحوی با صنعت آب و فاضلاب کشور مرتبط است نیز برای اجرای تمهیدات امنیتی و راهبردی برای مدیریت منابع و تأسیسات آبی توصیه شده است. مهندسی پدافند غیرعامل یک نیاز معماری، مهندسی و استراتژیک، برای کاهش تأثیر عملیات دشمن و تأمین امنیت پایدار سیستم‌های تأمین آب مانند منابع آب زیرزمینی، آب سدها، چاه‌های آب، خطوط انتقال، ایستگاه‌های پمپاژ، تصفیه‌خانه‌ها، مخازن ذخیره و شبکه‌های توزیع آب است. ازجمله راهبردهای امنیتی-دفاعی پدافند غیرعامل زیستی برای مقابله با آلودگی عمدی منابع آبی کشور می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

❖ تجهیزات جایگزین و تهیه مواد شیمیایی (از قبیل پمپ‌ها و دمنده‌ها برای مواقع اضطراری و تعمیرات)؛

❖ حفاظت ویژه (برای جلوگیری از دسترسی سایرین)؛

❖ نمونه‌برداری آب و کنترل (برای شناسایی به موقع آلودگی وارد شده احتمالی)؛

❖ خریداری و نصب تجهیزات فیزیکی، دریچه، پروژکتور یا دوربین‌های مداربسته امنیتی؛

❖ بهبود و اصلاح سیستم‌های الکترونیک، رایانه‌ای یا دیگر سیستم‌های اتوماتیک و سیستم؛

❖ سیستم‌های اعلام خطر جهت ارزیابی آلودگی منابع آب.

افزایش قدرت پیش‌بینی و تشخیص تهدیدات و مصون‌سازی ملی در برابر انواع آن با بهبود و اصلاح سیستم‌های الکترونیک امنیتی را می‌توان به‌عنوان یکی از راهبردهای پدافند

غیرعامل زیستی با رویکرد آینده‌پژوهی دفاعی-امنیتی برشمرد. هیچ فناوری عملی و در دسترسی جهت شناسایی زمان واقعی حمله عمدی یا اتفاقی به شبکه توزیع آب آشامیدنی وجود ندارد، درحالی‌که کشف و شناسایی سریع اختلال امنیتی در شبکه توزیع آب در مرحله اولیه، اقدام مناسب اصلاحی و حیاتی است. اگر یک حمله تروریستی به موقع شناسایی شود، با اخطار به مردم، آن‌ها از پیامدهای احتمالی حمله آگاه می‌شوند و انجام اقدامات پیشگیرانه ممکن و اثربخشی اقدامات حفاظتی بیشتر شده و مردم فرصت کافی برای مراقبت‌های بهداشتی و درمانی و حفاظت از خود در روزهای آتی خواهند داشت. با توجه به اینکه حملات تروریستی ممکن است به طریق مختلفی انجام شود، همیشه تأمین حفاظت فیزیکی کافی در مقابل عملیات خرابکاری تروریست‌ها، ضروری است. وجود سیستم‌های اعلام خطر برای حفاظت از سلامت مصرف‌کنندگان ضروری است و از فناوری شناسایی سریع استفاده می‌کنند، تا اینکه مسئولین بهداشت عمومی محلی یا ملی و کارکنان بخش اضطراری اقدامات لازم را به سرعت انجام دهند. اجزای اصلی سیستم‌های اعلام خطر شامل شناسایی آلودگی، توصیف صفات اختصاصی آلاینده، تعیین محل و مبدأ ایجاد آلودگی و ارتباط با مسئولین و مردم و واکنش به حادثه آلودگی است. بنابراین، هدف اصلی مقاله، ارائه یک مدل ریاضی برای شناسایی منشأ آلودگی در آب‌های زیرزمینی مورد تهاجم و ردیابی زمان و مکان انتشار آن است تا به عنوان بسته نرم‌افزاری در قالب راهبرد پدافند غیرعامل برای مقابله با تهدیدات نظامی-امنیتی آبی و پیش‌بینی مناطق حساس منابع آبی کشور به منظور حفظ و ارتقای سلامت و امنیت منابع آبی باشد (مرندی، ۱۳۹۳).

۴. پیشینه پژوهش

برنامه بهبود وضعیت بهداشتی، استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها و واکسیناسیون تأثیر بسزایی در باور مردم دهه ۱۹۶۰ گذاشت مبنی بر اینکه بالاخره بیماری‌های مسری از بین خواهند رفت. در نتیجه بیماری‌های مزمنی مانند بیماری‌های قلبی - عروقی و سرطان در کشورهای صنعتی به خصوص آمریکا مورد توجه قرار گرفتند؛ اما همچنان بیماری‌های مسری عامل درد و رنج



بشر و مرگ‌ومیر در کشورهای توسعه‌یافته بودند. علاوه بر این، عوامل بیماری‌های مسری دائماً در حال وفق دادن خود با محیط اطراف و تکامل یافتن بودند، به‌طوری‌که بیماری‌های مسری جدید مشتق از بیماری‌های موجود در آن زمان پا به عرصه وجود گذاشتند.

بیماری‌های تشخیص داده شده جدید در آن زمان شامل: بیماری لژیونر (۱۹۷۶)، سندروم سمی (۱۹۷۸)، هپاتیت C (۱۹۸۹) و هپاتیت E (۱۹۹۰) بودند. ویروس نقص ایمنی انسان (HIV) که عامل بیماری سندروم نقص ایمنی اکتسابی (AIDS) است، در سال ۱۹۸۱ در سرتاسر جهان ظاهر شد و مهم‌ترین راه انتقال آن رابطه جنسی تشخیص داده شد.

در همان سال‌ها بیماری‌هایی مانند سل و ذات‌الریه در مقابل آنتی‌بیوتیک‌ها، زنجیرهایی مقاوم تشکیل دادند و همین مقاومت آنتی‌بیوتیکی منجر به تغییر شکل عاملین این بیماری‌ها و در نتیجه تکامل آن‌ها شد. بیماری‌هایی مانند تب زرد و مالاریا دوباره ظاهر شدند و در نواحی مختلف آب و هوایی شیوع پیدا کردند. یکی از دلایل ظهور دوباره آن‌ها تغییرات آب و هوایی مناطق مختلف کره زمین بود. بیماری‌هایی مانند طاعون و وبا به‌صورت بیماری‌های جدیدی مانند جنون گاوی و تب برفکی ظاهر شدند. حیرت‌انگیز این بود که عوامل این بیماری‌های نوظهور همگی از عوامل بیماری‌های پیشین مانند باکتری‌ها، ویروس‌ها، تک‌یاختگان و کرم‌ها (مثل کرم کدو) به وجود آمده بودند.

از آنجاکه آزمایش‌های بالینی هم هزینه سنگینی را در برداشت و هم مدت‌زمان زیادی به طول می‌انجامید تا نتایج آن‌ها معلوم گردد و از طرفی برخی از بیماری‌ها را نمی‌شد به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کرد، دانشمندان به فکر مدل‌بندی آن‌ها با استفاده از علم ریاضی و به‌خصوص استفاده از دستگاه معادلات دیفرانسیل افتادند؛ به‌طوری‌که کم‌کم مدل‌های ریاضی به‌صورت ابزار مهمی در تجزیه و تحلیل و کنترل شیوع بیماری‌ها، به‌خصوص بیماری‌های مسری، درآمدند.

اولین بار در سال ۱۷۶۰ یک مدل ریاضی برای بیماری اپیدمی آبله‌مرغان توسط «دانیل برنولی» نوشته شد. این مدل میزان سلامتی افراد را در جلوگیری از پخش عامل بیماری آبله‌مرغان، تجزیه و تحلیل می‌کرد؛ اما کار جدی بر روی مدل‌بندی ریاضی بیماری‌های اپیدمی

در قرن بیستم شروع شد و از آن پس، بیماری‌ها یکی پس از دیگری به کمک ریاضیدانان و زیست‌شناسان مدل‌بندی شدند. این مدل‌ها طی سال‌ها کامل‌تر شده و کار تجزیه و تحلیل داده‌ها بر روی آن‌ها انجام شد. همچنین با روی کار آمدن رایانه‌ها، برنامه‌های شبیه‌سازی نیز برای آن‌ها تدوین شد. در ادامه به بیان دو مدل ریاضی می‌پردازیم که در پیشرفت‌های اخیر علم پزشکی در زمینه بیماری‌های عفونی بسیار مؤثر بوده‌اند.

در سال‌های اخیر الگویی ریاضی برای تشخیص اپیدمی مربوط به شایع‌ترین بیماری‌های عفونی، بر پایه پارامترهای آب و هوایی معرفی شده است. محققان مدرسه پزشکی دانشگاه «تافتس» در بوستون یک مدل ریاضی را ارائه کرده‌اند که با بررسی روزانه بیماری‌های عفونی، احتمال شیوع این بیماری‌ها را بر اساس پارامترهای محیطی در هر فصل ارزیابی می‌کند. براساس گزارش مدیرکل نیوز تودی، این دانشمندان مدل ریاضی خود را بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده توسط دانشگاه ماساچوست مربوط به شش بیماری آزمایش کردند. این شش بیماری عبارتند از: ژیا ردیا و کریپتوسپوریدیوم (دو بیماری عفونی روده‌ای)، سالمونلا و کمپیلو باکتر (دو بیماری شایع روده‌ای که در اثر ورود باکتری‌های سالمونلا و کمپیلو باکتر به روده بروز می‌یابند و در اروپا بسیار شایع است)، شیگلوسیس (بیماری مناطق گرمسیری که در اثر آلودگی با باکتری شیگلا بروز می‌یابد) و HIV که در اثر آلودگی با ویروس هپاتیت A به وجود می‌آید. سپس این دانشمندان با استفاده از اطلاعات آب و هوایی جمع‌آوری شده بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۱، شیوع هریک از این بیماری‌ها را در ماساچوست بر اساس درجه دمای متوسط روزانه، زمان و دوره ابتلا به هریک از این بیماری‌ها، مورد بررسی قرار دادند. نتایج اولیه آزمایش این مدل نشان داد که پیک شروع این بیماری‌ها به غیر از هپاتیت A با پیک گرما ارتباط دارد. سپس این محققان بر پایه اطلاعات روزانه، فصلی و ماهانه، مدل الگوریتمی ریاضی ارائه دادند که اپیدمی این بیماری‌های عفونی را مورد تحلیل قرار می‌دهد.

یکی دیگر از مدل‌های ریاضی که تحولی در زمینه علوم پزشکی ایجاد کرد، مدلی است که برای بیماری ایدز ارائه شده است. متخصصان عفونی و سایر پزشکان تا مدت‌ها تئوری مشخصی درباره ایدز داشتند و آن این بود که ویروس ایدز می‌تواند به سلول‌هایی خاص



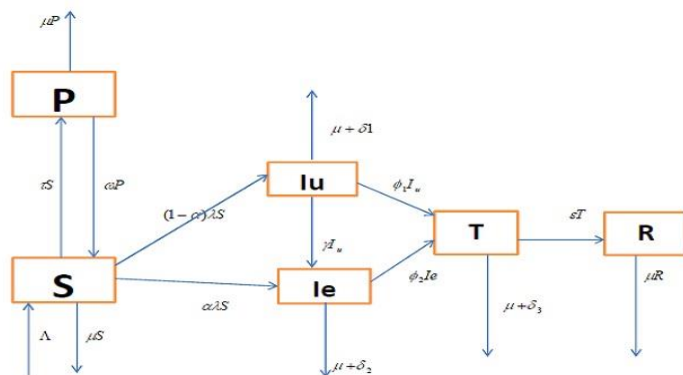
بچسبند و آن‌ها را آلوده کند. این سلول‌های آلوده که عمده آن‌ها از رده گلبول‌های سفید خون هستند، یا خودشان از بین می‌روند، یا این‌که سلول‌های خودی را به جای بیگانه می‌گیرند و آن‌ها را هم از بین می‌برند. شواهد بیولوژیک گوناگون هم برای تایید این فرضیه وجود داشت؛ اما گروهی از دانشمندان ریاضی، این فرضیه را که در دنیای پزشکی مقبولیت عام یافته بود، زیر سؤال بردند. این ریاضیدانان، مدلی ریاضی برای بیماری ایدز ارائه دادند و براساس این مدل نشان دادند که این فرضیه، توجیه‌کننده سیر آهسته بیماری، در طی سال‌ها، نیست و اگر این فرضیه پیشنهادی درست می‌بود، بیماری باید ظرف مدت چند ماه، فرد را از پای درمی‌آورد. این محاسبات تمام فرضیات پیشین و مقبول بین دانشمندان را به چالش کشید. البته این محققان در گزارش خود در نشریه پلاس مدیسن آورده‌اند که این پژوهش فقط یک مدل ریاضی است و نمی‌تواند بگوید که واقعاً در بدن بیمار آلوده به ویروس چه اتفاقی می‌افتد و بنابراین مقالات گسترده‌تری از لحاظ فیزیوپاتولوژی لازم است تا سیر تکثیر و بیماری‌زایی ویروس را در بدن انسان روشن کند. این مطالعه تنها به ما می‌گوید که باید در فرضیات قبلی خود تجدید نظر کنیم.

اغلب این مدل‌های ریاضی که در زمینه بیماری‌های مسری و عفونی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، از دستگاه معادلات زمان پیوسته تشکیل شده‌اند. برای اولین بار در سال ۱۹۰۶ هامر یک مدل زمان گسسته را ارائه داد و آن را به‌طور کامل مورد بررسی قرار داد. در این مدل تعداد بیماران در واحد زمان برحسب چگالی پخش بیماری مورد تحلیل قرار گرفت. بعدها برای کنترل بیماری‌هایی مانند مالاریا و بیماری‌هایی که از دام و حیوانات به انسان سرایت می‌کرد، از دستگاه معادلات دیفرانسیل استفاده فراوانی شد. ازجمله دانشمندانی که در این زمینه فعالیت‌های بسیاری در قرن حاضر داشته‌اند بوننفر و نوک هستند که مدل‌های پیشنهادی آن‌ها اساس بسیاری از بررسی‌ها قرار گرفته است. بیشترین اطلاعاتی که از این مدل‌ها به دست می‌آید، سرعت رشد بیماری، پارامترهای تکثیر اولیه ویروس، شرایط کاهش رشد بیماری و شرایط رسیدن به وضعیت رفع آلودگی است. مدل‌سازی ریاضی و بررسی دینامیک دستگاه‌های معادلاتی آن‌ها در اواسط قرن بیستم به رشد خوبی رسید، به‌طوری‌که

اولین کتاب مهم در این زمینه توسط بالی در سال ۱۹۵۷ به چاپ رسید که یکی از برجسته‌ترین و مهم‌ترین منابع مدل‌سازی و بررسی دینامیکی بیماری‌های عفونی است. در سال‌های اخیر، استفاده از شاخه‌های مختلف ریاضیات در اکثر علوم از جمله پزشکی، زیست‌شناسی، محیط‌زیست، اقتصاد، علوم مهندسی و هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌طوری‌که ریاضیات جزء لاینفک علم و دانش شده است. همیشه یکی از رؤیاهای ذهنی انسان در زندگی پیشگیری و کنترل عوامل ناخواسته و نامطلوب همچون بیماری‌ها بوده است. تکرار منظم همه‌گیری‌ها و شکل مشابه همه‌گیری‌های پشت سرهم یک بیماری برای مدت‌های طولانی باعث شده است که محققان ریاضی سعی در ایجاد مدلی برای تفسیر آن‌ها کنند و در نهایت با اعمال کنترلی حساب‌شده و دقیق، شیوع آن بیماری را مهار کنند.

۵. روش‌شناسی

مدل ریاضی رفتار دینامیکی بیماری تب تیفوئید:



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dt} = \tau S - (\mu + \omega)P - \mu S \\ \frac{dS}{dt} = \Lambda - S(\beta_1 I_u + \beta_2 I_e + \beta_3 T) + \omega P - (\tau + \mu)S \\ \frac{dI_u}{dt} = (1 - \alpha)S(\beta_1 I_u + \beta_2 I_e + \beta_3 T) - (\mu + \delta_1 + \phi_1 + \gamma)I_u \\ \frac{dI_e}{dt} = \alpha S(\beta_1 I_u + \beta_2 I_e + \beta_3 T) - (\mu + \delta_2 + \phi_2)I_e + \gamma I_u \\ \frac{dT}{dt} = \phi_1 I_u + \phi_2 I_e - (\mu + \delta_3 + \epsilon)T \\ \frac{dR}{dt} = \epsilon T - \mu R \end{array} \right. \quad (1)$$



معادله دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی برای تعیین مبدأ و محل انتشار آلودگی و توزیع مکانی آلاینده به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned}\frac{\partial C}{\partial t} &= \nabla \cdot (D \nabla C) - \nabla \cdot (vC) - \lambda C + S(X) \\ C(X, 0) &= f(X), X \in \Omega \subseteq R^3, \\ C(X, T) &= F(X), X \in \Omega \subseteq R^3\end{aligned}$$

که در آن تابع $f(x)$ ، میزان توزیع غلظت اولیه نامعلوم و $F(x)$ میزان غلظت محاسبه در لحظه T است که از طریق داده ها و مشاهدات آزمایشگاهی به دست می آید.

∇C : گرادیان غلظت

$C(X, t)$: میزان غلظت

$D(X)$: ضریب پخشیدگی

R : منبع انتشار

v : سرعت جریان

λ : نرخ زوال آلاینده

$S(x, y)$: منبع انتشار آلاینده

در حالت دوبعدی معادله پخش-انتشار فوق به معادله زیر تبدیل می شود:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, y) \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(x, y) \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (v(x, y)C) - \lambda(x, y)C + S(x, y)$$

و در شرایطی که محیط پخش آلاینده همگن باشد، ضریب پخشیدگی ثابت در نظر گرفته می شود و معادله فوق به معادله زیر تبدیل می شود:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_1 \frac{\partial C}{\partial x} + D_2 \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} (v(x, y)C) - \lambda(x, y)C + F(x, y)$$

هدف اصلی پیدا کردن تقریبی مناسب برای تابع غلظت اولیه $f(x, y)$ است، به طوری که برای تابع مشاهدات آزمایشگاهی $F(x, y)$ داشته باشیم:

$$\text{Min}|F(x, y) - C(x, T; f(x, y))|$$

در اصل مسئله فوق (مسئله معکوس)^۱ یک «مسئله بهینه‌سازی»^۲ مقید تحت شرایط خطی زیر است:

$$\begin{aligned} &\text{Optimization Problem:} \\ &\text{Min } \int_0^1 \int_0^1 |F(x, y) - C(x, y, T; f(x, y))|^2 dx dy \\ &\text{s. t} \\ &\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, y) \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(x, y) \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (v(x, y) C) - \lambda(x, y) C \\ &C(x, y, T) = F(x, y) \end{aligned}$$

که در آن $C(x, y, T; f(x))$ نماد میزان غلظت در زمان T با توجه به تابع ورودی $f(x, y)$ است. علاوه بر این برای $F(x)$ کران بالای خطا به دلیل خطای محاسبات آزمایشگاهی به صورت زیر است:

$$|F(x, y) - U(x, y, T; f(x, y))| \leq K.$$

با این رویکرد، مسئله معکوس به یک مسئله بهینه‌سازی مقید خطی تبدیل می‌شود. در اینجا، با ارائه یک الگوریتم عددی مبتنی بر درون‌یابی تابع مجهول $f(x, y)$ ، به دنبال پیدا کردن جواب تقریبی مناسب و پایدار برای تعیین میزان غلظت اولیه خواهیم بود.

۶. تجزیه و تحلیل یافته‌ها

۶-۱. الگوریتم عددی

بنا بر الگوریتم عددی پیشنهادی در این پروژه، ابتدا تابع مجهول $f(x, y)$ را به صورت زیر تقریب می‌زنیم:

$$f(x, y) \approx \sum_{i=0}^N f_i L_i(x, y),$$

که در آن $L_i(x, y)$ توابع درون‌یاب لاگرانژ تکه‌ای خطی برای تابع مجهول $f(x, y)$ است؛

1. Inverse problem
2. Optimization problem



از همین زو کافی است ضرایب f_i را تعیین کنیم. با جاگذاری تقریب فوق در مسئله بهینه‌سازی، بنا به خطی بودن مسئله پخش-انتشار، خواهیم داشت:

Optimization Problem:

$$\text{Min}_{f_i} \int_0^1 \int_0^1 \left| F(x, y) - \sum_{i=0}^N f_i U(x, y, T; L_i(x, y)) \right|^2 dx dy$$

s. t

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, y) \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(x, y) \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (v(x, y) C) - \lambda(x, y) C$$

$$C(x, y, T) = F(x, y)$$

برای تعیین ضرایب f_i ، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial f_i} \left(\int_0^1 \int_0^1 \left| F(x, y) - \sum_{i=0}^N f_i U(x, y, T; L_i(x, y)) \right|^2 dx dy \right) = 0, i = 0, \dots, N.$$

با کمینه‌سازی از طریق این فوق، یک دستگاه معادلات خطی به صورت زیر است

$$AX = B$$

$$A = \left[\int_0^1 \int_0^1 C(x, y, T; L_i(x, y)) \cdot C(x, y, T; L_j(x, y)) dx dy \right]_{i,j=0}^N$$

$$X = [f_0, f_1, \dots, f_N]$$

$$B = \left[\int_0^1 \int_0^1 F(x, y) \cdot U(x, y, T; L_0(x, y)) dx dy, \dots, \int_0^1 \int_0^1 F(x, y) \cdot U(x, y, T; L_N(x, y)) dx dy \right]$$

از آنجایی که حل دستگاه معادلات خطی فوق در ابعاد بالاتر از بدحالتی ممکن است برخوردار باشد؛ از همین رو از «روش‌های منظم‌سازی»^۱ یا الگوریتم‌های تصادفی مانند «الگوریتم ژنتیک»^۲ یا الگوریتم «هوش مصنوعی»^۳ برای پیدا کردن جواب تقریبی پایدار استفاده می‌شود.

به عنوان مثال، یک محیط متخلخل با ضریب انتشار $D_1 = 0.5$ و $D_1 = 0.05$ آلوده شده به ماده

1. Regularization method

2. Genetic algorithm

3. artificial Intelligence

رادیواکتیو به جرم m و $\lambda = 0.00002$ را در نظر می‌گیریم:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_1 \frac{\partial C}{\partial x} + D_2 \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}(vC) - \lambda C$$

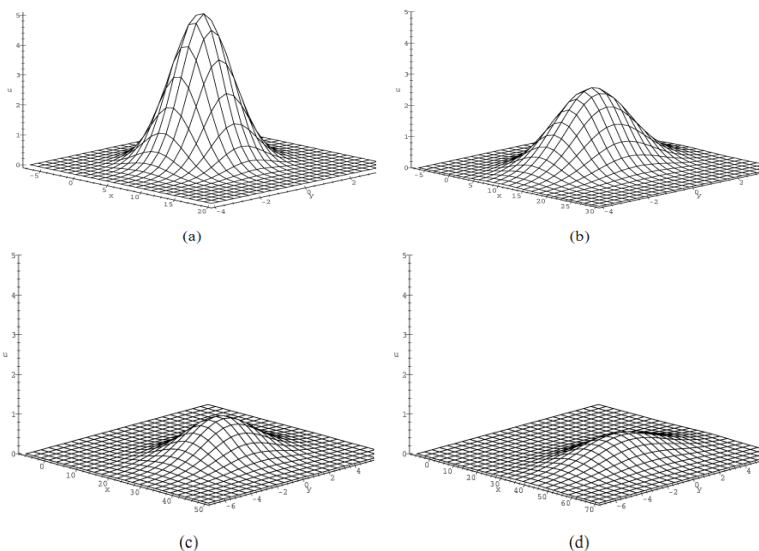
$$C(x, y, t) \rightarrow 0, \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty$$

$$C(x, y, 10) = ?$$

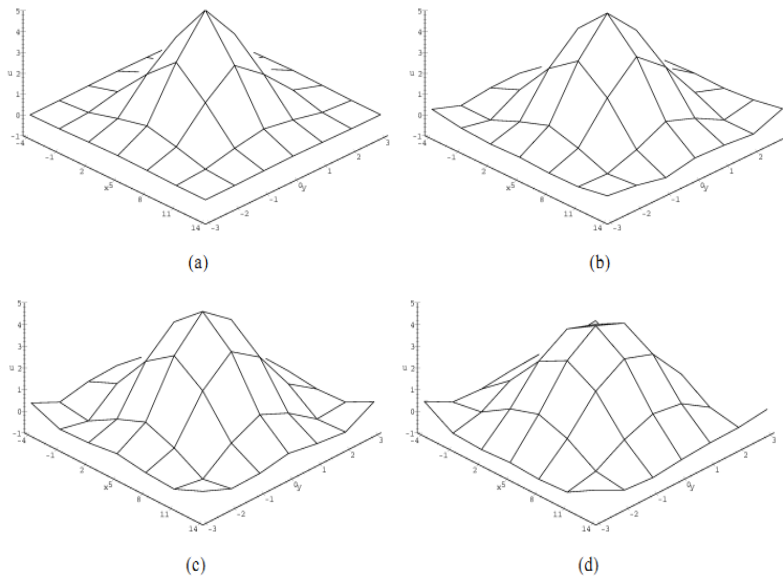
به‌طوری‌که دارای جواب تحلیلی است

$$C(x, y, t) = \frac{m/n}{4\pi t(D_1 D_2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(x-vt)^2}{4D_1 t} - \frac{y^2}{4D_2 t} - \lambda C\right)$$

شکل (۲)، میزان غلظت در روزهای $T = 10, 20, 50, 80$ را نشان می‌دهد. مقدار $C(x, y, T)$ با استفاده از جواب تحلیلی قابل محاسبه است. در اینجا، هدف اصلی بازسازی (تقریب) میزان غلظت اولیه در روز $t = 10$ و نشان دادن صحت و دقت روش پیشنهادی است. در شکل (۳)، (a) مقدار دقیق نمودار غلظت $C(x, y, 10)$ و (b و d)، جواب تقریبی به دست آمده (میزان غلظت اولیه بازسازی شده) $C_{App}(x, y, 10)$ ، با استفاده از الگوریتم عددی پیشنهاد شده با اطلاع از میزان غلظت در زمان‌های نهایی $T = 20, 50, 80$ است.



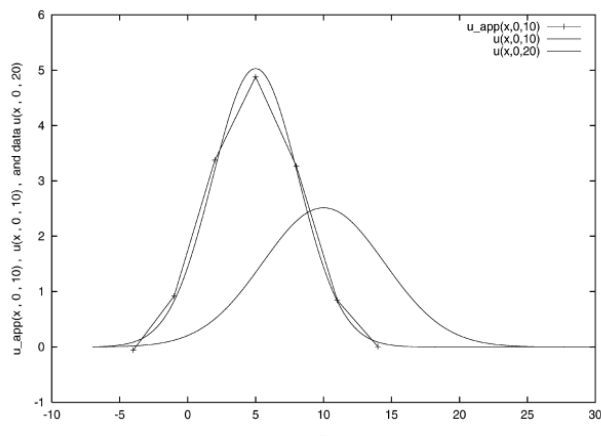
شکل ۲: میزان غلظت آلاینده در لحظات $T=10$ (a)، $T=20$ (b)، $T=50$ (c)، $T=80$ (d)



شکل ۳: میزان غلظت بازسازی شده در زمان‌های $t=10$ با استفاده از میزان غلظت در لحظات

نهایی $T=20,50,80$

نتایج مشاهده شده در شکل (۳)، دقت و تقریب مناسب برای تابع غلظت در لحظه $t = 10$ را با استفاده از میزان غلظت در فاصله‌های مختلف زمانی نشان می‌دهد. شکل (۴) نیز میزان غلظت بازسازی شده در برش $y = 0$ ، با استفاده از اطلاعات مکانی از میزان غلظت در روز $T = 20$ را نشان می‌دهد.



شکل ۴: میزان غلظت اولیه بازسازی شده در لحظه $t=10$

با استفاده از نمودار غلظت در لحظه $t = 10$ می‌توان اطلاعاتی از توزیع مکانی آلاینده و منشأ ایجاد آلودگی را تخمین زد. به‌عنوان یک نتیجه کلی و کاربردی، با به دست آوردن اطلاعات داده‌ای از مناطق مختلف مستعد آلودگی آب‌های زیرزمینی و به دست آوردن میزان غلظت آلودگی در آن نقاط مختلف از محدوده مطالعاتی می‌توان با پیاده‌سازی الگوریتم عددی پیشنهاد شده در این مقاله توزیع مکانی آلاینده در نقاط مختلف در یک زمان گذشته و منشأ و منبع ایجاد آن دسترسی پیدا کرد.

در نرم‌افزارهای مهندسی شبیه‌سازی جریان آب از جمله Modflow با استفاده از داده‌ها می‌توان مسیر حرکت و مقصد آلاینده را برای یک آبخوان پیش‌بینی کرد، ولی تعیین توزیع مکانی آلاینده در یک زمان قبل و تشخیص منبع آلاینده به‌طور مستقیم امکان‌پذیر نیست. بنابراین الگوریتم عددی معرفی شده در این مقاله را می‌توان یک ابزار جدید برای این نرم‌افزار ارائه داد.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

با توجه به راهبردهای تدوین شده در قالب مدل ریاضی در این پژوهش، پیشنهادهای اجرای پدافند غیرعامل زیستی ذیل جهت اقدامات امنیتی - دفاعی آتی ارائه می‌گردد:

❖ در نرم‌افزارهای مهندسی شبیه‌سازی جریان آب از جمله Modflow با استفاده از داده‌ها می‌توان مسیر حرکت و مقصد آلاینده را برای یک آبخوان پیش‌بینی کرد، ولی تعیین توزیع مکانی آلاینده در یک زمان قبل و تشخیص منبع آلاینده به‌طور مستقیم امکان‌پذیر نیست. بنابراین الگوریتم عددی معرفی شده در این مقاله را می‌توان یک ابزار جدید برای این نرم‌افزار ارائه داد؛

❖ نصب سیستم‌های اعلام خطر مجهز به این بسته نرم‌افزاری جهت پیشگیری از انتشار آلودگی در منابع آبی زیرزمینی آلوده شده با تعیین مکان و زمان و منبع ایجاد آلودگی؛

❖ تخمین میزان آلودگی در فاصله‌های مکانی مشخص در طول زمان انتشار آلاینده؛

❖ شناسایی و مراقبت از مناطق حساس و قابل نفوذ برای آلاینده از طریق اختفا یا



استتار؛

❖ ردیابی محل انتشار آلودگی و حذف آن و کاهش هزینه پاک‌سازی مناطق آلوده؛
❖ استفاده از صنعت بیوتکنولوژی در جهت رفع و پاک‌سازی منطقه آلوده بدون نیاز به استخراج و تصفیه آن در تصفیه‌خانه‌ها؛ استفاده از سیستم‌های تزریق خودکار به‌عنوان مثال تزریق نانو ذرات آهن در محل انتشار آلاینده از نوع ترکیبات کربنی در آب زیرزمینی؛

❖ جلوگیری از حرکت‌های آلودگی از منبع انتشار آن با استفاده از فناوری‌های نوین بیوتکنولوژی؛

❖ مجهز کردن چاه‌های برداشت آب زیرزمینی به سنسورهای تشخیص مواد آلاینده برای مقابله با تهدیدات آتی دشمن.

هدف اساسی مدل‌بندی ریاضی بیماری‌های واگیردار، مطالعه شیوع و پخش بیماری‌ها هم در فضا و هم در زمان است. به‌طوری‌که مکانیسم انتقال بیماری و ویژگی‌های تأثیرگذار آن، تصمیم‌گیرندگان را قادر به پیش‌بینی‌هایی در مورد بیماری و در نتیجه امکان طراحی استراتژی‌های کنترل بیماری بنماید. فهمیدن نوع سرایت بیماری‌های عفونی در منطقه یا کشور می‌تواند ما را به نزدیک شدن به کاهش انتقال بیماری هدایت کند.

فرایند انتخاب مدل و فرمول‌بندی آن موجب روشن شدن فرضیات، مقادیر و پارامترها می‌گردد، پارامترهای به‌کاربرده شده در یک مدل همه‌گیر باید تفسیر واضحی داشته باشد. مدل‌های ریاضی باید به‌گونه‌ای فرمول‌بندی شوند که علاوه بر اینکه ساده هستند، به‌اندازه کافی قابلیت جواب دادن به سؤالات پیش‌آمده را داشته باشند.

داشتن درکی درست از پارامترهای پیش‌بینی‌شده در مدل و دانستن ارتباط حاکم بین پارامترهای مختلف که در بیان ریاضی مدل شیوع یک بیماری خاص وجود دارند، نقشی تأثیرگذار در تحلیل آن مدل دارد.

بسیاری از مدل‌های ریاضی که در تحلیل شیوع بیماری‌های مسری به کار می‌روند، در اکثر مواقع در قالب چند معادله دیفرانسیل ظاهر می‌شوند. از آنجاکه به دست آوردن جواب

تحلیلی معادلات دیفرانسیل معمولی اغلب کاری سخت و در برخی موارد نیز غیرممکن است، بنابراین روش‌های عددی می‌توانند با تقریب جواب معادله دیفرانسیل، به‌عنوان ابزار اساسی به کار گرفته شوند.

اینک در راستای شبیه‌سازی ریاضی شیوع بیماری‌ها سؤالات زیر مطرح می‌شود که از اهداف و کارهای آتی پیشنهادی آتی محسوب می‌شوند؛

- ✓ چگونه می‌توان با استفاده از مدل‌سازی ریاضی از شیوع رده‌ای خاص از شیوع بیماری‌های مسری نظیر سرخک، سرخچه، آبله‌مرغان، ایدز و ... با توجه به شرایط بومی و منطقه‌ای جلوگیری نمود؟
- ✓ چگونه می‌توان برای یک بیماری واگیردار با توجه به شرایط بومی و منطقه‌ای، مدل ریاضی مناسبی ارائه نمود؟
- ✓ چگونه می‌توان با توجه به مدل ریاضی یک بیماری مسری در یک جامعه هدف، اپیدمی بودن بیماری را در آن جامعه تشخیص داد؟



فهرست منابع

- رضایی، رضا و همکاران (۱۳۸۹)، «ارزیابی آلودگی شیمیایی منابع آب زیرزمینی مناطق پایین دست محل دفن زباله شهر سنندج»، مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی کردستان، دوره پانزدهم. صص ۸۹-۹۸.
- فرزاد بهتاش، محمدرضا (۱۳۸۰)، «دانشنامه مدیریت شهری»، سازمان پدافند غیرعامل، تهران.
- یحیی پور، محمدصادق و همکاران (۱۳۹۵)، «آمایش و مکان یابی از منظر پدافند غیرعامل»، انتشارات فقه الصادق.
- بخشی شادمهری، فاطمه و همکاران (۱۳۹۶)، «تحلیل ملاحظات پدافند غیرعامل در زیرساخت های شهری با تأکید بر زیرساخت آب»، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۳، شماره ۱۲۲.
- بهمنش شکیب، داود؛ کارگر، احمد (۱۳۹۶)، «ارائه مدل نظری هماهنگی بین سازمانی در مدیریت راهبردی بحران های طبیعی با روش فراترکیب»، فصلنامه علمی پژوهشی مطالعات بین رشته ای دانش راهبردی، دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی، شماره ۲۷.
- مرنندی، عمید (۱۳۹۳)، «پدافند غیرعامل و مسئولیت پذیری برای آینده پایدار ایران»، فصلنامه پایداری، توسعه و محیط زیست، دوره ۱، صص ۶۴-۵۷.
- جلالی فراهانی، غلامرضا (۱۳۹۱)، «مقدمه ای بر مبانی نظری پدافند غیرعامل با رویکرد تهدیدات جدید» تهران: انتشارات دانشگاه امام حسین (ع).
- کرمی، تاج الدین؛ غفاریان بهرمان، محمد (۱۳۹۶)، «آینده پژوهی بحران آب و چالش های امنیتی آن. مورد مطالعه: شهرستان رفسنجان» فصل نامه علمی- تخصصی دانش انتظامی، شماره ۲۱، صص ۷۹-۴۹.
- رضاییان، احد؛ رضاییان، علی حسین (۱۳۹۵)، «آینده پژوهی بحران آب در ایران به روش سناریوپردازی»، اکوهیدرولوژی. دوره ۳، شماره ۱.
- زندحسامی، حسام؛ فرهادی، کاوه (۱۳۹۶)، «بازاندیشی در نظام آینده اندیشی (مطالعه موردی: آب)». فصلنامه علوم اجتماعی، دوره ۲۴، شماره ۷۷.
- خسروی، مژگان (۱۳۹۶)، «بیوترورسیم در آب و مواد غذایی». فصلنامه علمی-پژوهشی

- دانشگاه علوم پزشکی لرستان. شماره ۳، ویژه‌نامه پدافند غیرعامل.
- توکلی، حمیدرضا؛ صراف‌پور، رضا (۱۳۹۶)، «تهدیدات بیولوژیکی ناشی از آلودگی عمدی آب و مواد غذایی در شرایط عادی و نظامی». فصلنامه علمی و آموزشی دفتر توسعه آموزش، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بقیه‌الله (عج)، سال نهم، شماره ۳۳.



References

- Keeling, Matt J., and Pejman Rohani. Modeling infectious diseases in humans and animals. Princeton University Press, 2011
- Padmanabhan, P., P. Seshaiyer, and C. Castillo-Chavez. "Mathematical modeling, analysis and simulation of the spread of Zika with influence of sexual transmission and preventive measures." *Letters in Biomathematics* 4.1 (2017): 148-166..
- Nie, Lin-Fei, and Ya-Nan Xue. "The roles of maturation delay and vaccination on the spread of Dengue virus and optimal control." *Advances in Difference Equations* 2017.1 (2017): 278Zakary, Omar, Mostafa Rachik, and Ilias Elmouki. "On the analysis of a multi-regions discrete SIR epidemic model: an optimal control approach." *International Journal of Dynamics and Control* 5.3 (2017): 917-930.
- Khan, M. A., et al. "Mathematical modeling and stability analysis of Pine Wilt Disease with optimal control." *Scientific Reports* 7 (2017).
- Wang, Lianwen, et al. "Global dynamics and optimal control of an influenza model with vaccination, media coverage and treatment." *International Journal of Biomathematics* 10.05 (2017): 1750068.
- Khan, Tahir, Gul Zaman, and M. Ikhlaq Chohan. "The transmission dynamic and optimal control of acute and chronic hepatitis B." *Journal of biological dynamics* 11.1 (2017): 172-189.
- Biswas, Santanu, et al. "Optimal combinations of control strategies and cost-effective analysis for visceral leishmaniasis disease transmission." *PloS one* 12.2 (2017): e0172465.
- Chowell, Gerardo, and James M. Hyman, eds. *Mathematical and statistical modeling for emerging and re-emerging infectious diseases*. Springer, 2016.
- Rachah, Amira, and Delfim FM Torres. "Mathematical modelling, simulation, and optimal control of the 2014 Ebola outbreak in West Africa." *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2015 (2015).
- Nowzari, Cameron, Victor M. Preciado, and George J. Pappas. "Analysis and control of epidemics: A survey of spreading processes on complex networks." *IEEE Control Systems* 36.1 (2016): 26-46.
- Tikhonov, A. N. & Arsenin, V.Y., (1977). *Solutions of Ill-posed Problems*, Winston, Washington.
- Atmadja, J. & Bagtzoglou, A.C., (2001). Pollution source identification in heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.* 37, 2113–2125.
- Beck, J. V., (1985). *Inverse Heat Conduction Ill-Posed Problem*, John Wiley Int Sc.
- Tikhonov, A. N. & Arsenin, V.Y., (1977). *Solutions of Ill-posed Problems*, Winston, Washington.
- Atmadja, J. & Bagtzoglou, A.C., (2001). Pollution source identification in heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.* 37, 2113–2125.
- Beck, J. V., (1985). *Inverse Heat Conduction Ill-Posed Problem*, John Wiley Int Sc.
- Andersson, J., Frank, J. and Tony, S. (2005). Interactions between predator-and diet-induced phenotypic changes in body shape of crucian carp. *Environmental Biology of Fishes*, 273: 431–437.
- Blake, R. W. (1983). Fish locomotion. *Journal of Ichthyology*, 13: 58–68.
- Eagderi, S., Fricke, R. Esmaeili, H. R. and Jalili, P. (2019). Annotated checklist of the fishes of the Persian Gulf: Diversity and conservation status. *Iranian Journal of Ichthyology*, 6 (Suppl. 1): 1–171.

- Froese, R. and Pauly, D. (Eds.). (2023). FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org, version (02/2023). Accessed 24.4.2023.
- Keivany, Y., Nasri, M., Abbasi, K. and Abdoli, A. (2016). Atlas of inland water fishes of Iran. Iran Department of Environment Press, Tehran. 218 pp.